

# Vérification expérimentale de modèles opto-thermo-élastiques simulés avec le logiciel OOFELIE Multiphysics

*A. Mazzoli<sup>(1)</sup>, P. Saint-Georges<sup>(2)</sup>, A. Orban<sup>(1)</sup>, J-S. Ruess<sup>(3)</sup>, J. Loicq<sup>(1)</sup>, C. Barbier<sup>(1)</sup>,  
Y. Stockman<sup>(1)</sup>, M. Georges<sup>(1)</sup>, P. Nachtergaele<sup>(2)</sup>, S. Paquay<sup>(2)</sup>, P. De Vincenzo<sup>(2)</sup>*

*(1) Centre Spatial de Liège, Avenue du Pré-Aily, 4031 Angleur, Belgique*

*(2) Open Engineering, Rue des Chasseurs-Ardenais 8, 4031 Angleur, Belgique*

*(3) GDTech, Rue des Chasseurs-Ardenais 8, 4031 Angleur, Belgique*

## 1. Introduction

Le but de ce travail est de comparer les prédictions du logiciel OOFELIE Multiphysics avec les résultats obtenus sur un banc de test afin d'en déduire des possibles améliorations à apporter au logiciel. Pour ce faire, deux systèmes optiques sont définis et modélisés dans OOFELIE. Le premier se compose d'une lentille sphérique en BK7 maintenue dans une monture en aluminium et chauffée à l'aide de résistances chauffantes. Les effets des contraintes thermo-mécaniques induites par la variation de température sur les performances optiques de la lentille sont mesurés par interférométrie. Le deuxième système optique est un barreau de cristal YAG chauffé à l'aide d'un four adapté. Pour ce cas test, des mesures interférométriques et polarimétriques sont réalisées. Les premières servent à mesurer la modification de géométrie du barreau au niveau des dioptries d'entrée et de sortie due à l'effet de lentille. Les secondes ont pour but de déterminer le changement de polarisation lié à la biréfringence induite par les contraintes mécaniques au sein du barreau. Les bancs de test respectifs et leurs résultats sont décrits ci-dessous et comparés aux résultats des simulations d'OOFELIE.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Multi- $\Phi$  et financé par la Région Wallonne (Belgique). Ce projet profite d'une importante collaboration entre des concepteurs de logiciels informatiques, des centres de recherche, des universités et des industriels tous situés en Wallonie. Son but est de développer un logiciel complet et innovant capable de modéliser des systèmes complexes faisant intervenir des interactions multiphysiques couplées.

## 2. OOFELIE Multiphysics

OOFELIE Multiphysics est un outil de modélisation numérique capable d'adresser des problèmes multiphysiques couplés, incluant les domaines optique, mécanique, thermique, fluide, électrique, électromagnétique, acoustique,...[1] La solution OOFELIE est couplée avec le logiciel de simulation optique ZEMAX via une communication complètement automatisée. L'analyse approfondie des performances optiques de systèmes opto-thermo-mécaniques sous contraintes est dès lors possible, améliorant ainsi le design des systèmes optiques.

## 3. Cas test de la lentille sphérique

La lentille sphérique est en BK7 et biconvexe. Elle présente une focale de 200 mm et un diamètre de 50 mm. La monture est en aluminium anodisé noir et maintient la lentille en place grâce à un anneau vissé dans la monture. La lentille et sa monture sont issues du commerce.

La lentille (dans sa monture) est tenue devant l'interféromètre à l'aide d'une pince associée à une monture 5 axes pour permettre l'alignement de la lentille. La lentille est chauffée à l'aide de deux résistances chauffantes (ou heaters) collées sur la monture. Des thermocouples sont placés sur la monture afin de surveiller l'évolution de la température pendant les mesures (Cf. Figure 1). Une première série de mesures est réalisée pour évaluer la distribution de température sur la lentille en fonction de la température imposée sur la monture. Pour cela, des thermocouples sont collés sur

chaque face de la lentille (au centre et au bord pour la face avant, au centre pour la face arrière). Ces derniers sont ensuite retirés pour permettre les mesures interférométriques.

Les mesures de la dégradation des performances optiques de la lentille s'effectuent ensuite à l'aide de l'interféromètre. Un calibre sphérique d'ouverture F/3.3 est placé en sortie de l'interféromètre pour obtenir l'illumination de l'entière de la lentille. La lentille est installée dans le faisceau de l'interféromètre à une distance du point focal égale à sa longueur focale, ce qui rend le faisceau collimaté après avoir traversé la lentille. Un miroir plan de bonne qualité ( $\lambda/20$ ) est placé derrière la lentille pour réfléchir ce faisceau collimaté, à travers la lentille, vers l'interféromètre.

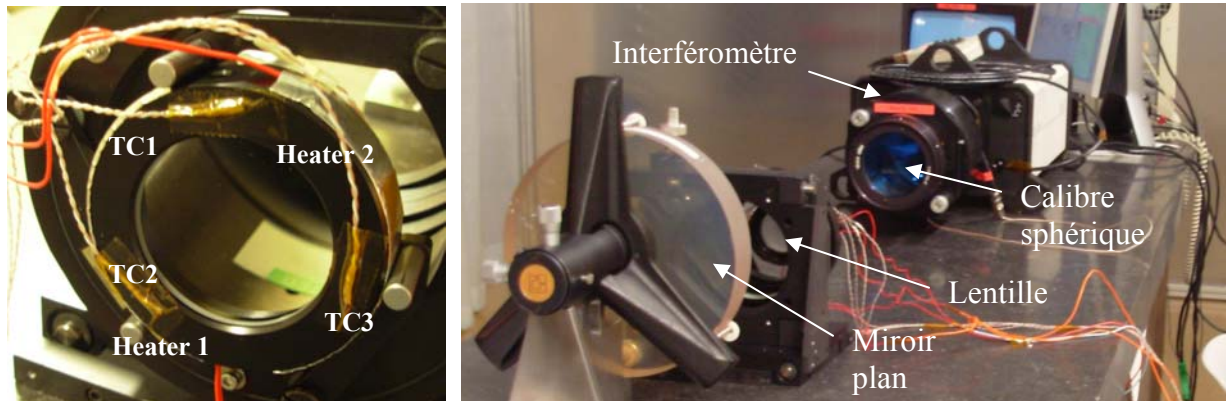


Figure 1 : Position des heaters et des thermocouples sur la monture et photo du banc de test.

Les mesures interférométriques sont effectuées à température ambiante ainsi qu'à différentes températures en chauffant la monture jusqu'à une température maximale de 80°C, au moyen des heaters. La dégradation des performances optiques de la lentille est obtenue par comparaison de la WFE du faisceau aux différentes températures avec la WFE à la température ambiante.

Deux exemples de cartes de WFE à température ambiante et à une température de 57.2°C au centre de la lentille, ainsi que la soustraction de ces 2 cartes sont présentés ci-dessous (Cf. Figure 2). La principale aberration apparaissant avec l'augmentation de température est du focus. Il est quantifié grâce au coefficient de Zernike correspondant à cette aberration.

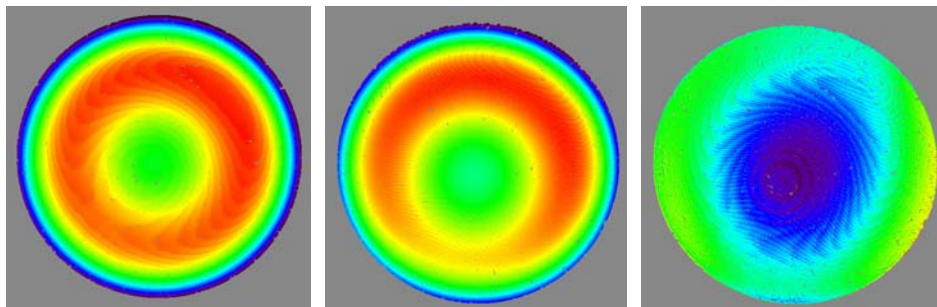


Figure 2 : WFE mesurées aux températures de 20.5°C et 57.2°C au centre de la lentille et soustraction de ces deux cartes.

La lentille, sa monture ainsi que l'apport de chaleur par les heaters ont été modélisés dans le logiciel OOFELIE couplé à ZEMAX pour l'analyse des variations des propriétés optiques de la lentille avec la température. Des flux convectifs entre la lentille et l'air ambiant sont considérés et le champ de températures obtenu présente une bonne correspondance avec les températures mesurées sur la monture et la lentille lors des tests.

Deux simulations ont été réalisées, la première ne permet pas de mouvement de la lentille dans sa monture et la deuxième permet à la lentille de glisser à l'intérieur de la monture. Intuitivement, cette dernière solution semble la plus réaliste car une dilatation de la monture suite à l'échauffement peut conduire à une perte de contact partiel entre la lentille et la monture. La comparaison du focus obtenu pour les deux simulations avec celui mesuré lors des tests confirme cette idée (Cf. Figure 4).

Il est important de noter que la déformation de la lentille seule ne suffit pas pour obtenir les dégradations optiques observées. La variation de l'indice de réfraction dans le volume de la lentille doit aussi être considéré. Le gradient d'indice de réfraction calculé par OOFELIE à partir du champ de température simulé (cf. Figure 3) est exporté dans ZEMAX en plus des déformations géométriques.

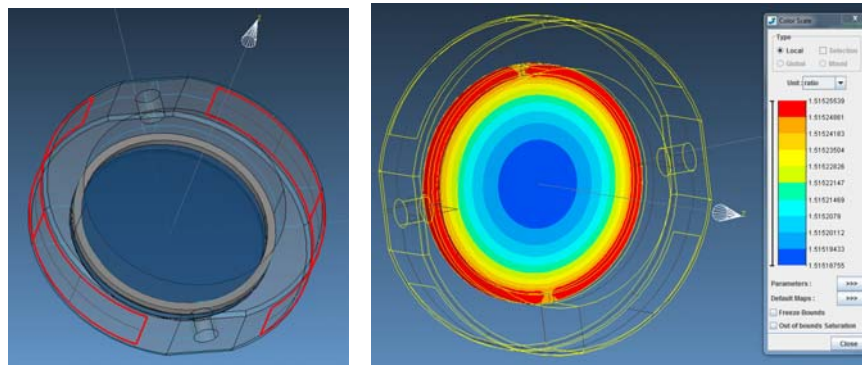


Figure 3 : Modèle de la lentille et de la monture dans OOFELIE et gradient d'indice de réfraction dans la lentille pour une température de 78.7°C.

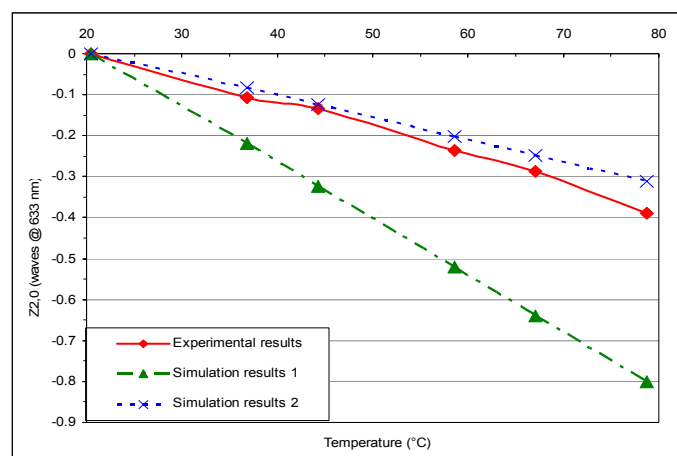


Figure 4 : Comparaison entre le coefficient de Zernike du focus mesuré et simulé.

#### 4. Cas test du barreau YAG

Le barreau YAG présente une section carrée de 12 mm de côté et une longueur de 50 mm. Les deux plus petites faces sont polies et constituent les faces d'entrée et de sortie du barreau. Un four adapté à ce cristal est utilisé pour simuler l'échauffement dû au pompage laser (Cf. Figure 5). Un système de contrôle de la température est associé au four et permet de monter jusqu'à une température de 200°C avec une précision de 0.5°C et une stabilité de 0.1°C.

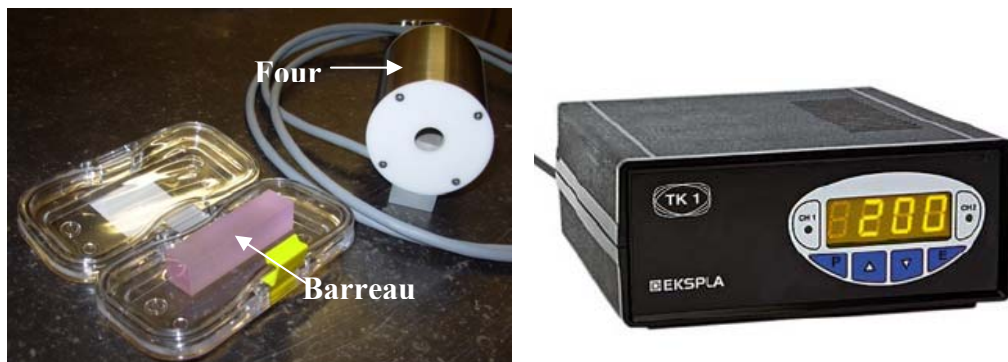


Figure 5 : Barreau YAG avec son four et son contrôleur de température.

Le test interférométrique du barreau YAG est semblable à celui réalisé sur la lentille mis à part que le calibre utilisé avec l'interféromètre est plan et non sphérique afin de produire une onde plane (Cf. Figure 6). Une mesure de référence est effectuée à température ambiante puis d'autres mesures sont faites pour différentes températures du four (jusqu'à une température maximale de 100°C).

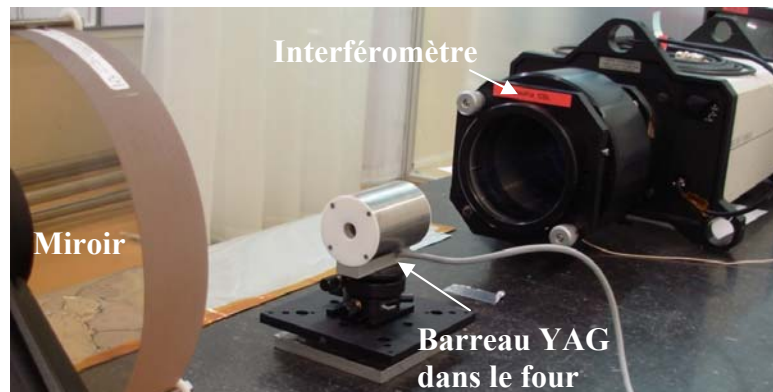


Figure 6 : Banc de test interférométrique du barreau YAG.

La principale aberration observée lors des mesures interférométriques et provenant de l'échauffement du barreau est à nouveau du focus. L'évolution avec la température du coefficient de Zernike correspondant est présentée ci-dessous (Cf. Figure 7). La courbe bleue de cette même figure représente le coefficient de Zernike du focus obtenu avec les simulations du barreau YAG dans OOFELIE. Ce résultat ne correspond pas du tout à ce qui a été mesuré car le modèle numérique doit encore être amélioré, notamment par la modélisation du four et des échanges thermiques entre le four et le barreau.

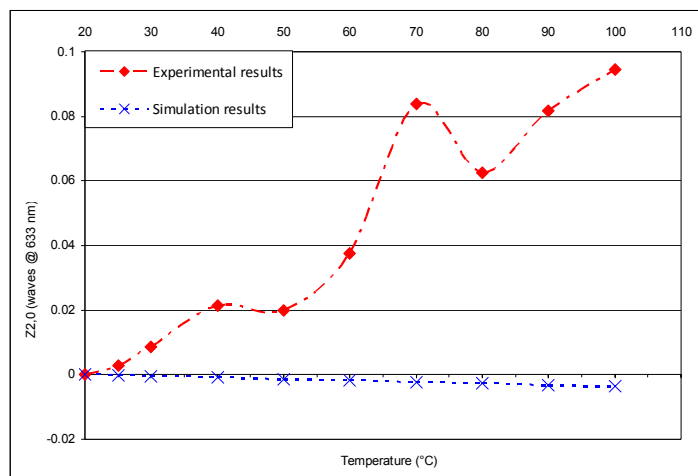


Figure 7 : Comparaison de l'aberration du focus mesurée et simulée pour le barreau YAG.

Le banc de test polarimétrique utilisé pour les mesures de biréfringence est présenté ci-dessous (Cf. Figure 8). Il se compose d'un laser hélium-néon, d'une lame quart d'onde, de deux polariseurs et d'un détecteur. Le barreau YAG dans son four est placé entre les deux polariseurs. La méthode utilisée consiste à faire tourner le premier polariseur tout en maintenant l'analyseur fixe. Un photodétecteur mesure l'intensité lumineuse traversant les deux polariseurs et le barreau YAG.



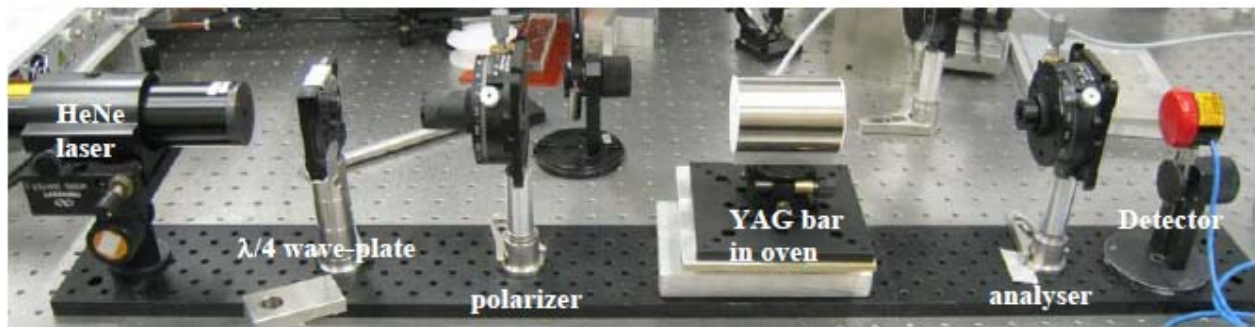


Figure 8 : Banc de test polarimétrique du barreau YAG.

Grâce à la méthode décrite ci-dessus, l'évolution de la biréfringence en fonction de l'angle du polariseur peut être mesurée. On en déduit le déphasage entre les polarisations TE et TM pour différentes températures du four (Cf. Figure 9). D'après ce graphique, on voit qu'une faible biréfringence apparaît avec l'augmentation de la température.

Ci-dessous est également présentée l'évolution de l'intensité de la lumière passant à travers le barreau lorsque les deux polariseurs sont croisés à  $90^\circ$  lors d'une phase de transition entre deux températures du four (Cf. Figure 9). L'augmentation de l'intensité signifie une modification de la polarisation de la lumière induite ici par la biréfringence apparaissant dans le barreau YAG.

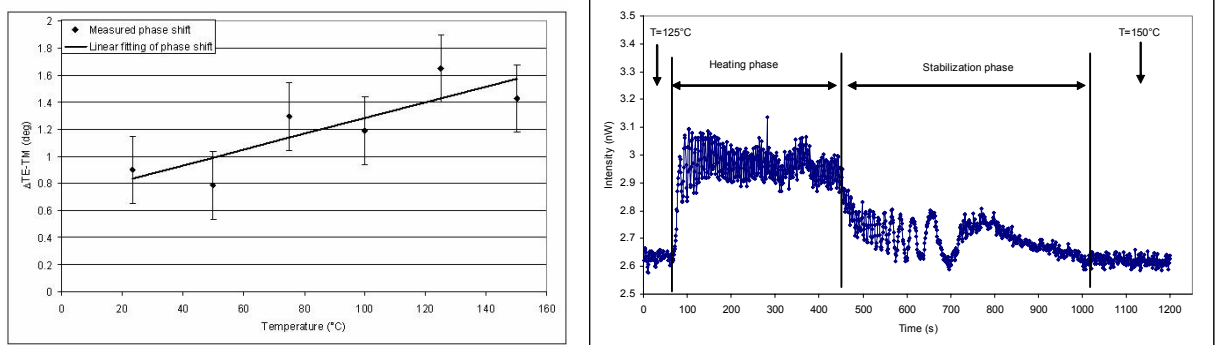


Figure 9 : Evolution du déphasage entre les polarisations TE et TM en fonction de la température et évolution de l'intensité de lumière transmise au travers du barreau YAG et des deux polariseurs croisés lors d'une phase d'échauffement du four.

On distingue deux phases dans les résultats : une phase d'échauffement du four et une phase de stabilisation de la température du four. Lors de la phase d'échauffement, le gradient de température dans le barreau est important et induit de la biréfringence et par conséquent une rotation de la polarisation. Celle-ci permet à la lumière de passer au travers des polariseurs croisés. Lors de la phase de stabilisation, cet effet diminue et s'amortit au cours du temps jusqu'à disparaître.

Ces résultats ne sont que préliminaires et ne permettent pas encore une comparaison avec les simulations d'OOFELIE. Cependant, les simulations ont été comparées aux calculs théoriques de biréfringence (par le calcul de différences de chemin optique entre deux ondes planes polarisées linéairement et croisées) appliqués à un barreau YAG cylindrique et ont montré une bonne correspondance avec la théorie (Cf. Figure 10).

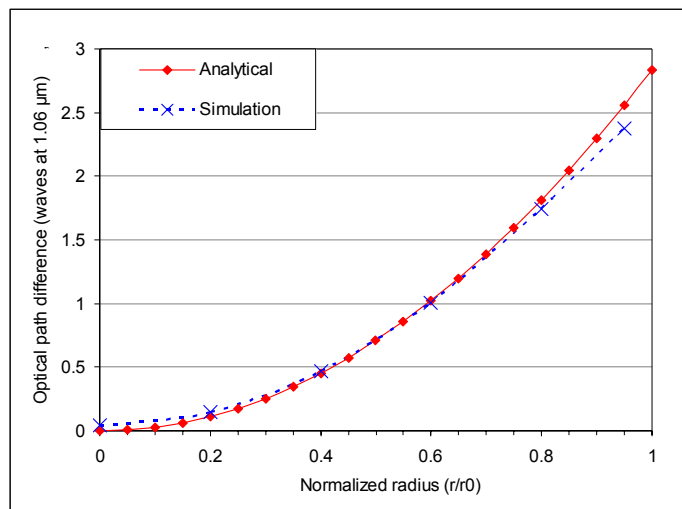


Figure 10 : Comparaison des différences de chemin optique simulées et calculées pour un barreau YAG cylindrique.

## 5. Conclusion

Pour comparer les résultats de simulations dans OOFELIE à des résultats expérimentaux, deux cas test ont été réalisés. Le premier se compose d'une lentille chauffée dans sa monture et mesurée par interférométrie afin de déterminer la dégradation du front d'onde suite à l'échauffement. Le deuxième comprend des mesures interférométriques et polarimétriques sur un barreau de cristal YAG chauffé dans un four adapté.

Dans le cas de la lentille, l'aberration à analyser est le focus et les simulations dans OOFELIE donnent des résultats proches de ce qui a été mesuré. Pour parvenir à ces résultats, il est nécessaire que le modèle prenne en compte la possibilité pour la lentille de bouger dans sa monture ainsi que l'apparition d'un gradient d'indice de réfraction dans la lentille.

Pour le barreau YAG, l'aberration principale due à l'échauffement est également du focus mais les simulations dans OOFELIE n'ont pas donné de résultats concluants. Un modèle plus précis des conditions d'échauffement et de l'environnement du barreau est nécessaire. En ce qui concerne les mesures polarimétriques, elles ont permis de mettre en évidence l'apparition de biréfringence à l'intérieur du barreau suite à son échauffement mais aucune mesure quantitative n'a pu être effectuée jusqu'à présent. Une comparaison avec les simulations d'OOFELIE n'est donc pas encore possible mais fait bien sûr partie de la suite de ce projet.

## 6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Région Wallonne pour son financement au travers du projet Multi- $\Phi$  (Plan Marshall).

## 7. Bibliographie

1. I. KLAPKA & A. CARDONA, « An object oriented implementation of the finite element method for coupled problem », Revue Européenne des Eléments finis, vol. 7, n° 5, pp. 469-504, 1998.
2. V. PARTENOV, V. SHASHKIN & E. STEPANOV, « Numerical Investigation of Thermally Induced Birefringence in Optical Elements of Solid-State Lasers », Appl. Opt., vol. 32, n° 27, pp. 5243-5255, 1993.

3. Nye, J.F., [Physical Properties of Crystals – Their Representation by Tensors and Matrices], Clarendon Press, Oxford (2009).
4. Jamieson, T.H., « Thermal effects in optical systems », Opt. Eng. 20 (April 1981).
5. Yoder, P.R., Jr., [Mounting Optics in Optical Instruments], SPIE Press, 2002.
6. Jamieson, T.H., « Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint », SPIE Proc., CR43 (1992).
7. Foster J.D. and Osterink L.M., « Thermal Effects in a Nd:YAG Laser », J. Appl. Phys. 41(9), 3656-3663 (1970).
8. Koechner W. and Rice D.K., « Effect of Birefringence on the Performance of Linearly Polarized YAG:Nd Lasers », IEEE J. Quantum Electron. QE-6(9), 557-566 (1970).
9. Koechner W., « Thermal Lensing in a Nd:YAG Laser Rod », Appl. Opt. 9(11), 2548-2553 (1970).